A AVALIAÇÃO DO TRANSPORTE DE CARGA SUSPENSA NO ALTO RIO PARANÁ POR MEIO DO USO DE IMAGENS CBERS/CCD

Edvard Elias de SOUZA FILHO[1]
Vânia Rosa PEREIRA[2]
Alexandre Marques de AGUIAR

RESUMO

A formação do reservatório de Porto Primavera no final de 1998 provocou diversas modificações no rio Paraná, entre as quais a redução da carga suspensa. No segmento logo a jusante da barragem os valores de concentração de sedimentos em suspensão medidos no ano 2000 apresentaram média de 1,04 mg/l em Porto Primavera, e de 10,70 mg/l em Porto São José, situado 35 quilômetros a jusante, após a foz do rio Paranapanema. Àquela época, o incremento da carga foi atribuído à incorporação de sedimentos oriundos da erosão marginal e da remoção de sedimentos do leito. Contudo, a evolução do ajuste fluvial tem levado à redução da erosão marginal e à remoção dos sedimentos de fundo. Este trabalho foi realizado para verificar qual a variabilidade espacial da carga suspensa como forma de avaliar a contribuição de ambas as fontes de sedimentos. Para isso foram utilizadas imagens do sensor CCD do satélite CBERS 2, cena 161/125, de 01/08, 22/09, e 13/11 de 2004, banda 2. As imagens foram trabalhadas no software SPRING, onde foram georreferenciadas, tiveram o canal recortado, passaram por correção atmosférica e radiométrica, após o que foram submetidas ao fatiamento (slicing). Os resultados demonstraram que a reflectância do canal aumentou quando houve aumento da descarga fluvial, e que nos três períodos a reflectância do reservatório de Rosana foi maior que a do de Porto Primavera, que a jusante das barragens os rios apresentam valores menores que os do reservatório, e que os valores do rio Paraná são inferiores aos do rio Paranapanema. Alem disso, em ambos os rios não há variação longitudinal de reflectância, e que apenas junto às margens há aumento significativo de seus valores. Tais informações permitem concluir que a carga suspensa no reservatório de Rosana e no rio Paranapanema é maior que em Porto Primavera e no rio Paraná, que os reservatórios são estratificados, com maior carga na parte superior da lâmina d'água, que ambos os cursos fluviais não incorporavam carga do leito no período estudado, e que a erosão marginal contribui para o aumento da carga em suspensão, embora os valores sejam pouco significativos. Por fim, a metodologia utilizada mostrou ser uma eficiente ferramenta para orientar o sistema de coleta de campo.

INTRODUÇÃO

As características de um canal fluvial são o resultado da inteiração entre inúmeros processos e formas que ocorrem em sua bacia de drenagem. A modificação das referidas formas ou processos proporcionam alterações das variáveis que possuem relações de dependencia com aquela que foi modificada.

O rio Paraná tem uma história de alterações provocdas por causas naturais, tais como alternâncias climáticas (STEVAUX *et al.* 1997, 2004), ou por interferência humana, seja pela ocupação de sua bacia, seja pela construção de barragens (SOUZA FILHO, 1999; SOUZA FILHO *et al.* 2004).

[1] Universidade Estadual de Maringá, Professor Doutor, edvardmarilia@wnet.com.br.
[2] Universidade de Campinas, mestranda.

As barragens começaram a ter influência no regime de débitos registrado em Guaíra a partir da década de 1970, e passaram a controlar este regime a partir da década de 1980 (ROCHA *et al.* 1999; SOUZA FILHO *et al.*, 2004b). Contudo, a construção da barragem de Porto Primavera causou um efeito adicional no segmento fluvial situado a jusante de seu eixo.

O segmento situado nas proximidades de Porto Rico (PR) mostrou modificações no que diz respeito ao suprimento de sedimentos desde 1992, quando foi realizado o desvio de primeira fase (SOUZA FILHO, 1999). A partir de seu fechamento no final de 1998, a barragem aumentou o controle sobre o suprimento de sedimentos, o regime de débitos e as características da água (SOUZA FILHO, 1999; SOUZA FILHO *et al.* 2004b).

Os primeiros estudos sistemáticos sobre o transporte de sedimentos realizado pelo rio na porção a jusante de Porto Primavera foram efetuados em 1999 e 2000. Durante este período, duas seções foram monitoradas mensalmente. Uma delas foi localizada em Porto Primavera (MT), a cinco quilômetros abaixo da barragem, e a outra foi localizada em Porto São José (PR), a trinta e cinco quilômetros a jusante dela.

Os resultados obtidos em Porto Primavera demonstraram que os sedimentos de leito foram removidos durante o período estudado, e que a concentração do material em suspensão foi de 1,04 mg/l (valor médio anual) (ROCHA, 2001). Os dados coletados mostraram também que a concentração aumentava durante os períodos de cheia, e que os seus valores foram sempre mais elevados nas proximidades da margens, embora nunca tenham ultrapassado 3 mg/l.

Os resultados obtidos em Porto São José demonstraram que as formas de leito permaneciam com a mesma geometria e velocidade de deslocamento, mas que a granulação dos sedimentos diminuia ao longo do período amostrado. Os dados de carga suspensa demonstraram que a concentração média no período foi de 10,7 mg/l, com maiores valores junto às margens, e na faixa de água oriunda do rio Paranapanema. A amostragem mostrou também que a concentração aumentava no período de cheia (CRISPIM, 2001).

A integração desses resultados com aqueles anteriormente existentes mostrou que antes de 1992 a concentração de carga suspensa era superior a 35 mg/l, e que aumentava no período de vazante (SOUZA FILHO *et al.* 2004b). Essa análise demonstrou também que o aumento da concentração da carga suspensa para jusante era devida à erosão marginal, à remoção dos sedimentos do leito e à contribuição do rio Paranapanema.

A continuidade dos estudos em Porto São José no período de 2002 a 2003 demonstrou que as formas de leito reduziram sua altura de 7 para 0,5 metros, e passaram a ser dominadas por areia gossa e seixos (MARTINS *et al.* 2004). Esses dados demonstraram que o processo de remoção de carga de fundo havia atingido a seção de Porto São José (SOUZA FILHO *et al.* 2004).

O acompanhamento da remoção da carga de fundo gerou a questão que é abordada neste artigo, ou seja: se a carga suspensa foi reduzida em função da barragem, e a remoção da carga de fundo também foi realizada, resta saber se está havendo incorporação de carga suspensa, e qual a fonte dela.

A investigação de campo para responder a tais perguntas exigia a coleta de dados sistemática em uma área muito extensa, e estaria limitada a valores pontuais. Por essa razão optou-se pela realização de um trabalho exploratório com o objetivo de investigar a variabilidade espacial e temporal da carga suspensa, e a contribuição da erosão marginal e da carga de fundo para o aumento de sua concentração.

MÉTODOS e TÉCNICAS

A área de estudo escolhida foi o segmento fluvial do rio Paraná compreendido entre a barragem de Porto Primavera e Porto Rico (PR), e o segmento do rio Paranapanema situado a jusante da Barragem de Rosana. A opção por essa área deveu-se a possibilidade de verificar a variação espacial desde os reservatórios, ao fato de haver uma considerável série de dados disponível, e pela facilidade de tratamento das imagens, uma vez que toda a área encontra-se em uma mesma cena (161/125).

As hipóteses de trabalho adotadas foram: 1- se há contribuição da carga de fundo, a incorporação acumulativa deve fazer com que a carga suspensa aumente para jusante. 2- se há contribuição da erosão marginal, as faixas marginais devem apresentar maior quantidade de sedimentos em suspensão, e a quantidade de sedimentos e a largura da faixa devem aumentar para jusante. 3- O aumento da carga suspensa deve aumentar a reflectância da água do rio.

A reflectância espectral de um corpo d'água depende das propriedades espectrais de seus componentes. Os componentes de um volume d'água que afetam seu comportamento espectral podem ser classificados em: pigmentos e complexos protéicos responsáveis pela fotossíntese, substâncias orgânicas dissolvidas e material particulado em suspensão (BRICAUD & SATHYENDRANATH, 1995).

A reflectância espectral dos sedimentos em suspensão na superfície da água ocorre em função da quantidade e das características (tamanho das partículas e concentração) dos materiais presentes na água. Lodhi et al. (1997 apud JENSEN 2000) utilizaram um espectroradiômetro para medir a reflectância espectral da água pura e de água com vários sedimentos em suspensão e clorofila. Neste levantamento puderam perceber que os cumprimentos de onda da luz do visível, entre 580 – 690 nm, fornecem informações dos sedimentos em suspensão na superfície da lâmina d´água, enquanto o infravermelho, entre 714 – 880nm, pode ser utilizado para determinar a quantidade dos sedimentos suspensos.

Uma vez que os produtos do sensor CCD do satélite CBERS 2 foram escolhidos para a realização do trabalho, as imagens das bandas 2 (0,52 a 0,59 μm), 3 (0,63 a 0,69 μm), e 4 (0,77 a 0,89 μm) foram selecionadas para serem analisadas, porque tais bandas são sensíveis aos comprimentos de onda relacionados com os sedimentos em suspensão.

Por outro lado, os dados disponíveis relativos à carga em suspensão do rio Paraná demonstram que a sua concentração aumenta conforme o aumento da descarga fluvial. Para avaliar a reflectância da água do rio em diferentes situações de descarga foram escolhidas tres passagens diferentes sem cobertura de nuvens.

As passagens escolhidas foram as de 01/08, 22/09, e 13/11 de 2004, dias em que o rio Paraná registrou as vazões de 6.315 m³/s, 7.668 m³/s, e 6.478 m³/s na estação fluviométrica de Porto São José (PR). As imagens foram adquiridas gratuitamente a partir do "site" do INPE, e foram trabalhadas por meio do programa SPRING. As tres imagens foram georreferenciadas, e tiveram a área do canal recortada para que o tratamento abrangesse apenas a lâmina da água.

O fato da superfície do objeto de interesse deste trabalho ser um alvo líquido traz inúmeras conseqüências e interferências na qualidade das informações do respectivo alvo. Para atenuar os processos que interferem na qualidade das informações oferecidas pelo sensor, as imagens passaram por um pré-processamento: correções atmosféricas, radiométricas e geométricas.

O método utilizado para realizar a correção atmosférica foi baseado no método físico de transferência radiativa atmosférica, conhecido como um programa referente ao modelo 5S (*Simulation of Satellite Signal in the Solar Spectrum*) de correção atmosférica a ser aplicado aos dados CCD/CBERS-2.

A correção radiométrica das imagens foi realizada para normalizar as diferenças entre os ângulos de elevação solar, para permitir a adequada comparação entre as imagens de

passagens diferentes. A correção não pode ser aplicada para a calibração das imagens porque não há biblioteca espectral específica para o rio Paraná.

A correção geométrica foi feita com a técnica do "vizinho mais próximo", segundo a qual o valor de cinza a ser atribuído ao pixel Z terá o mesmo valor do nível de cinza do pixel que se encontrar mais próximo da posição ocupada por Z. Optou-se por esta técnica de georreferenciamento por esta ser de rápido processamento, de fácil implementação e por não alterar os valores originais de cinza.

Apesar das correções efetuadas, o tratamento das imagens não permitiu excluir a provável contribuição do leito do rio no que diz respeito à reflectância registrada. Para escolher a banda com menor contribuição de informações do fundo foi elaborado um conjunto de perfis radiométricos a partir de cada imagem. Todos os perfis foram elaborados na seção de Porto São José, onde a topografia do leito é bem conhecida, assim como a variabilidade da concentração da carga suspensa.

Para o caso em questão, as imagens da banda 2 apresentaram melhor resultado. Essas imagens foram então utilizadas para a obtenção dos valores máximos e mínimos de pixel, para a obtenção das classes utilizadas para o fatiamento (slicing) delas. O resultado obtido pelo fatiamento permitiu a espacialização das informações e a análise da distribuição das reflectâncias relativas.

RESULTADOS

O resultado do fatiamento com os valores da grade de reflectância na banda 2 do sensor CBERS 2 está apresentado nas figuras 1,2 e 3. A figura 1 mostra o resultado obtido para a imagem de 01/08/2004.

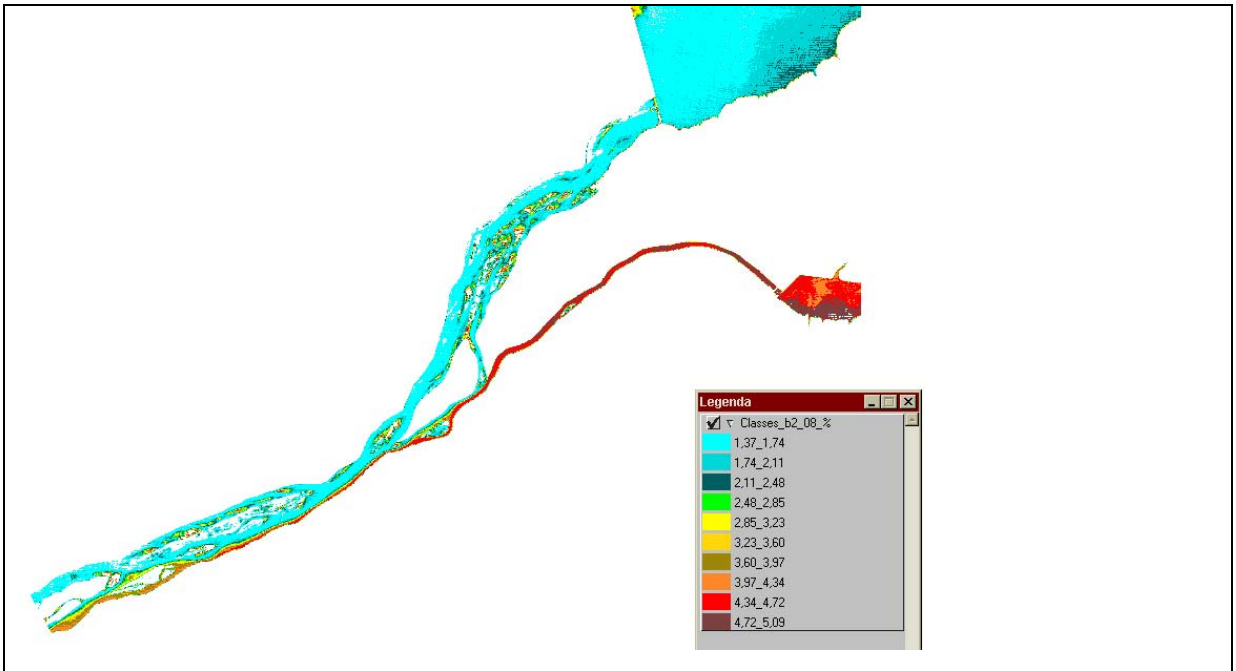

Figura 1 Imagem resultante do fatiamento da banda 2 da passagem de 01/08/2004. O rio Paraná aparece em azul, eo rio Paranapanema em vermelho. A imagem cobre cerca de 70 quilômetros do rio Paraná.

As águas do reservatório de Porto Primavera apresentam reflectância de 1,37 a 1,74 % nas proximidades da barragem, que é a mesma apresentada pelo rio Paraná em todo o segmento estudado, exceto na faixa junto à margem paranaense, sob influência das águas do rio Paranapanema, e junto às ilhas, onde há barras fluviais sub-aflorantes.

As águas do rio Paranapanema exibem valores entre 4,34 e 4,72 % dentro do reservatório de Rosana, e passam exibir valores entre 4,72 e 5,09 % após sair da barragem, repetindo grandezas encontradas na porção sul do reservatório. A reflectância de suas águas diminui para jusante, em especial após sua entrada no rio Paraná, chegando a 3,97 % na extremidade sul da imagem.

Caso a reflectância indique a carga suspensa, o que podemos observar é que o sistema Paranapanema possui concentrações mais elevadas de sedimentos em suspensão, o que é confirmado pelos dados já obtidos em campo. Por outro lado, as águas que saem da barragem apresentam valores mais elevados que as águas do reservatório que estão próximas do eixo. Isso pode indicar que o reservatório estava estratificado, com maior concentração de sedimentos nos níveis situados abaixo da superfície. A diminuição da concentração para jusante indica que o rio não incorpora sedimentos.

O rio Paraná tambem não mostra incorporação significativa de sedimentos, seja pela erosão marginal, seja pela remoção de sedimentos do fundo, já que os valores de reflectância permanecem semelhantes desde o reservatório de Porto Primavera até a extremidade do segmento estudado. A exceção dessa regra ocorre em áreas de barras submersas e junto à margem esquerda, graças às águas provenientes do rio Paranapanema.

O aumento da reflectância nas áreas de barras fluviais pode representar a reflexão do leito, ou pode estar indicando a ressuspensão de sedimentos arenosos. A faixa de contribuição do rio Paranapanema mostra uma clara diluição da carga à medida em que a faixa se alarga. Essa diluição é evidenciada não só pela diminuição da reflectância mas pela gradação lateral.

A figura 2 mostra o resultado obtido para a passagem de 22/09/2004. ambos os rios mostram reflectâncias mais elevadas que aquelas mostradas anteriormente, mas os maiores valores continuam sendo exibidos pelas águas do rio Paranapanema.

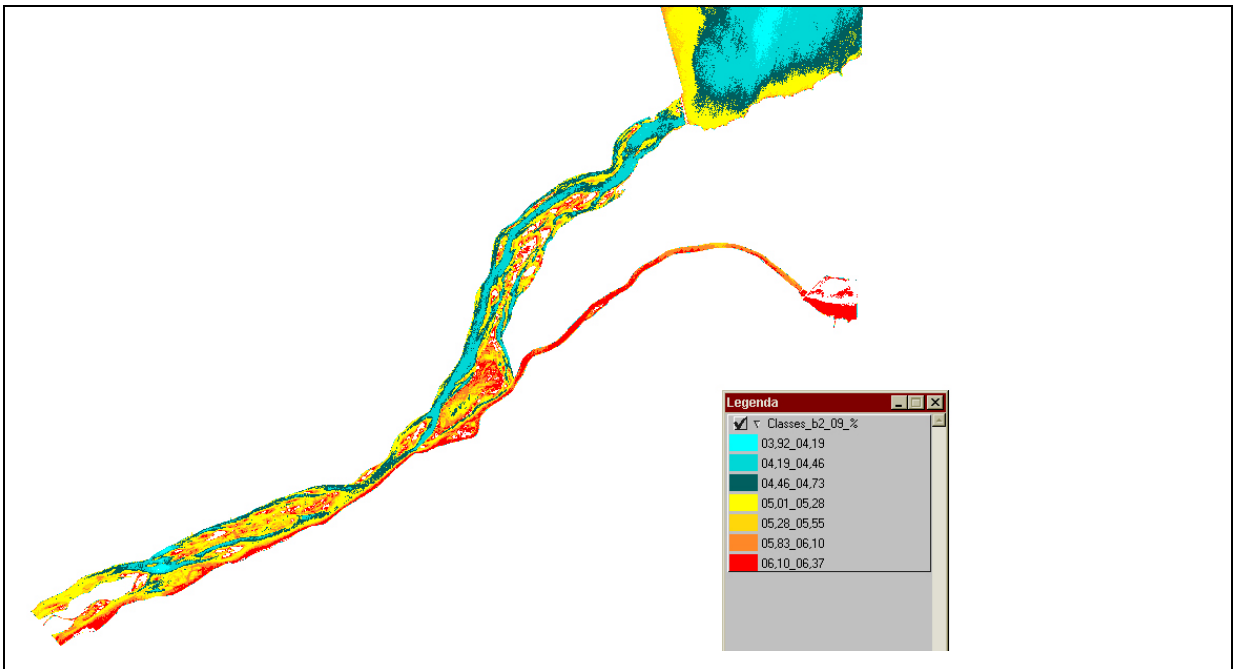

Figura 2 Imagem resultante do fatiamento da banda 2 da passagem de 22/09/2004.

Neste caso, o reservatório de Porto Primavera apresentou reflectância com valores que aumentam do centro para a borda. Na área central a reflectância apresentou valores entre 3,92 e 4,19 % e nas faixas junto às bordas os valores chegaram ao intervalo entre 5,01 e 5,28 %. A maior quantidade de carga na borda do reservatório pode ser indicativa de incorporação de sedimentos via erosão marginal. Como o reservatório é um lago artificial, a erosão deve ocorrer pela ação de ondas.

As águas na saida do reservatório apresentaram valores mais baixos, situados entre 4,19 e 4,46 %. Contudo, junto à sua margem direita, as águas que saem do reservatório possuem reflectância mais alta, entre 5,01 e 5,28.

Esses dados indicam que os vertedores estavam funcionando junto à margem direita, e tomando água da superfície, enquanto as tomadas de água estavam drenando águas mais profundas. Nesse caso há indicação de estratificação do reservatório, e as águas superficiais estariam com maior carga porque ela estaria sendo gerada junto às margens.

Ao longo do rio é possível perceber diversas modificações. No segmento superior, há continuidade de faixas de menor reflectância (5,01 a 5,28 %) e de faixas com valores mais altos. Uma das faixas representa a continuidade a jusante das águas que sairam do reservatório com valores mais elevados. A outra faixa está associada ao conjunto de ilhas e barras fluviais.

No segmento a jusante da foz do rio Paranapanema, a reflectância das águas do rio Paraná aumentam para 4,43 a 4,76 %, e para 5,01 e 6,37 %. Logo a jusante os valores diminuem para intervalos entre 3,92 e 4,46 %, e a seguir voltam a aumentar até 6,37 %.

O padrão observado indica aumento da reflectância junto à parte montante e lateral das ilhas, e diminuição na porção situada a jusante delas. Nesse caso, é provável que haja re-suspensão da carga arenosa, e deposição nas áreas de menor velocidade situadas a jusante das ilhas.

Nessa passagem pode ser observado tambem que junto às margens há elevação da reflectância, mas isso não é observável na imagem devido a pequena dimensão da faixa, restrita a um ou dois pixels. Tais faixas são contínuas e aparecem em todas as margens, e devem indicar a contribuição da erosão marginal. Contudo, o fato da faixa não se alargar no sentido de jusante mostra que o processo não contribui significamente para o aumento da carga suspensa.

O reservatório de Rosana mostrou valores de reflectância situados entre 6,10 e 6,37 %. O rio Parananema manteve o intervalo de valores, com pequenas variações locais. Após a sua foz, suas águas persistiram com reflectâncias situadas no mesmo intervalo.

A imagem obtida em 13/11/2004 apresentou algumas diferenças em relação às demais (figura 3). O reservatório de Porto Primavera apresentou um padrão caótico quanto a distribuição da reflectância. Embora os valores mais frequentes estivessem situados no intervalo entre 6,99 e 8,54 %, todas as classes utilizadas para o fatiamento apareceram em sua área de ocorrência. Tal distribuição pode ser explicada pela circulação das águas superficiais, que movidas pelo vento fazem a redistribuição dos sedimentos oriundos da ação das ondas sobre sua margem direita.

As águas do rio Paraná apresentaram valores entre 3,12 e 3,90 %, com faixas com água com reflectância entre 2,35 e 3,12 %. Para jusante as faixas de menor valor tornaram-se dominantes.

Mais uma vez há indicação de liberação de água com diferentes características, e de estratificação do reservatório. Contudo, nesse caso observa-se a perda de carga em direção

a jusante, sugerindo que parte do material em suspensão é constituido de frações mais grosseiras, uma vez que teriam se precipitado em água corrente.

As áreas relacionadas a ilhas e barras mostraram novamente um aumento da reflectância, mas com menor intensidade e menor área de abrangência, indicando uma menor intensidade do processo de re-suspensão. Da mesma forma, há um aumento da reflectância nos pixels situados junto à margem, indicando a ação da erosão marginal, ainda que pouco significativa

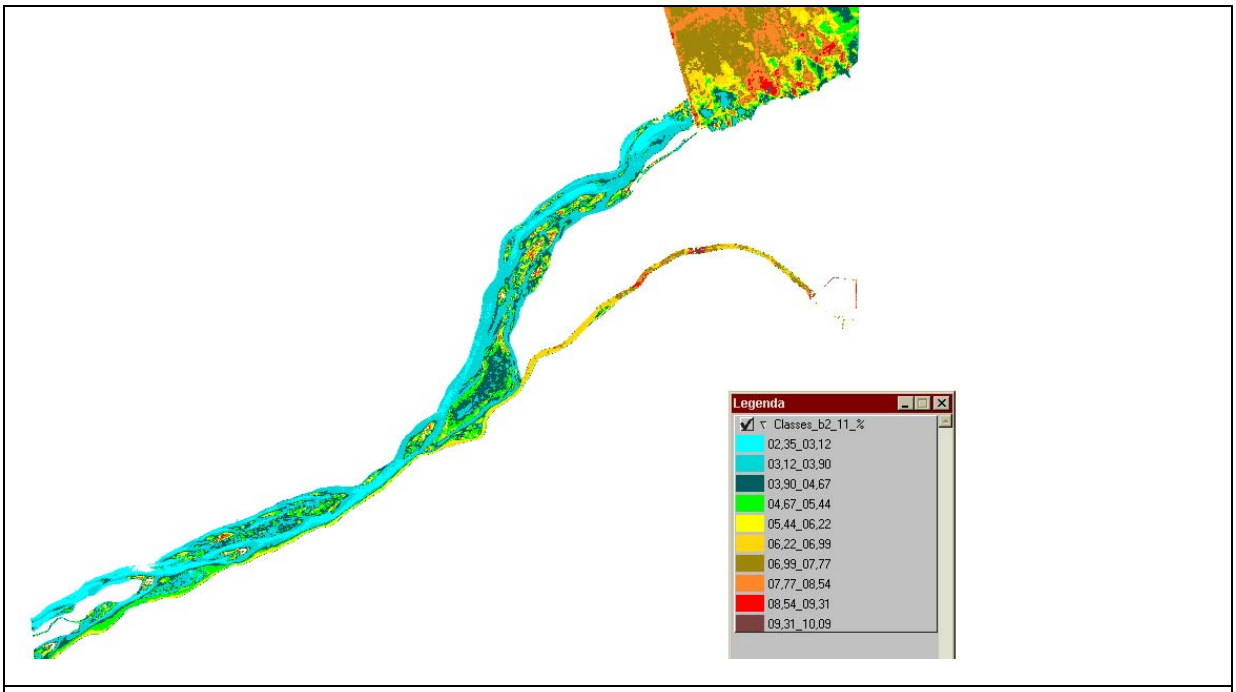

Figura 3 Imagem resultante do fatiamento da banda 2 da passagem de 13/11/2004.

O reservatório de Rosana mostrou valores superiores a 10,09 %, e o rio Paranapanema mostrou o domínio de reflectância situada no intervalo de 6,22 a 6,99 %, com variações locais, e redução para jusante. Após sua foz, suas águas apresentaram uma redução para valores situados entre 4,67 e 5,44 %.

Nesse caso há indicação de que o reservatório estava estratificado e que as águas superficiais possuiam maior concentração que as mais profundas. Esta situação é coerente com a atuação de vento redistribuindo os sedimentos oriundos da erosão das margens do reservatório. A diminuição da reflectância para jusante reitera a possibilidade da decantação de parte da carga em suspensão e evidencia a mistura das águas com as do rio Paraná.

A análise das tres imagens permite concluir que o sistema Paranapanema possui maior concentração de sedimentos em suspensão, pois em tres condições diferentes a reflectância foi maior neste curso fluvial. Alem disso há indicação de estratificação da coluna de água de ambos os reservatórios, já que a água de saida pode apresentar valores de reflectância diferentes daqueles exibidos pelo reservatório.

As imagens indicam também o papel do vento no aporte de carga e mistura das águas superficiais dos reservatórios, via ação de ondas nas margens e no corpo de água. Aparentemente parte dessa carga incorporada é constituida de termos mais grosseiros, uma vez que parte dela é perdida ao longo do segmento fluvial.

A observação da reflectância das partes marginais indica que dentro dos valores de vazão que ocorreram nos dias de obtenção das imagens a erosão marginal foi mais intensa nos

dias de maiores débitos, porem os valores não foram significativos para considerá-la como um processo que realmente contribua para o aumento de carga do rio Paraná.

Pode ser concluido tambem que há uma relação entre o aumento do débito do rio Paraná e o aumento da carga em suspensão, mas esse aumento nào é causado pela incorporação de sedimentos do fundo, mas sim pelo aumento de carga nos reservatórios.

Por fim, as imagens mostram que a ressuspensão de sedimentos ocorre, e é mais intensa em vazões mais elevadas, mas aparentemente já não há mais sedimentos finos no leito, uma vez que após colocados em suspensão, os sedimentos tornam a ser depositados.

A distribuição espacial e temporal da reflectância de imagens da Banda 2 do sensor CCD do CBERS 2 das águas dos rios Paraná e Paranapanema mostram tambem a necessidade de modificação das rotinas de coleta de água para a avaliação da carga em suspensão, e principalmente, mostram a necessidade do estabelecimento de uma relação entre reflectância e carga sedimentar.

REFERÊNCIAS

BRICAUD,A., SATHYENDRANATH,S. Spectral signature of substances responsible for the change in ocean colour. In: **International colloquium on spectral Signatures of Objects in Remote Sensing**. Avignon Signature Spectrales d`Objects in Teledétection. Avignon, 1995, P41-45.

CRISPIM J. Q. - Alterações na hidrologia do canal após construção de reservatório a montante: o caso da Usina Hidrelétrica de Porto Primavera, Rio Paraná. Dissertação de Mestrado, Universidade Estadual de Maringá, Pós-graduação em Ecologia de Ambientes Aqüáticos Continentais, 2001, Maringá, PR, 25p.

JENSEN, J. R. **Remote Sensing of the environment: an earth resources perspective** / 1. Earth sciences – Remote sensing. I Title. II Series. Prentice-Hall, Inc. Upper Sadle River, New Jersey, 2000.

MARTINS, D.; MEURER, M.; STEVAUX, J. C.; SOUZA FILHO, E. E. 2004.O regime de cheias e o transporte de carga de fundo no alto rio Paraná Brasil.In: **II SEMINÁRIO LATINO AMERICANO DE GEOGRAFIA FÍSICA**, 2004, Puerto Vallarta. Proceedings : Instituto de Geografia UNAM, 2004. p. 1-8.

ROCHA, J. A. da As características geomorfológicas do canal do rio Paraná no segmento imediatamente a jusante da Usina Hidrelétrica de Porto Primavera. **Dissertação de Mestrado** defendida junto ao PEA, UEM, 2001, MARINGÁ (inédito).

ROCHA, P. C., SOUZA FILHO, E. E., & FERNANDEZ, O. V. Q. Intensity of erosive processes at channel banks of up Parana river, Porto Rico Town area, Parana State, Brazil. **International Symposium on Paleohydrology Geomorphology. of Large Rivers and Field Conference**, Araguaia, 3pp 1999.

SOUZA FILHO.; STEVAUX, J. C. . Geology and Geomorphology of the Baia – Curutuba – Ivinheima River Complex. In: Thomaz, S.M.; Agostinho, A.A. ; Hahn, N.S. (eds). **The Upper Paraná River and its Floodplain**, Backhuys Publishers, Leiden, 2004, 1-29.

SOUZA FILHO, E. E.; ROCHA, P. C.; COMUNELLO, E.; & STEVAUX, J. C. – Effects of the Porto Primavera Dam on physical environment of the downstream floodplain. In: **The Upper Paraná River and its Floodplain**, Backhuys Publishers, Leiden, 2004, v. 1; p. 55-74.

STEVAUX, J. C.; TAKEDA , A. M.; & MORAES, M. Dinâmica sedimentar no canal do rio Paraná. **XI Simpósio Sul Brasileiro de Geologia**, v. 1, (284-286), 1995.

STEVAUX, J. C.; MARTINS, D. O.; & SOUZA FILHO, E. E. Characteristcs and dynamic of the Paraná River channel bedform. **The Floodplain of the Parana River: Physical Structures and Processes**. EDUEM, v. 1; 14-18, 2004.